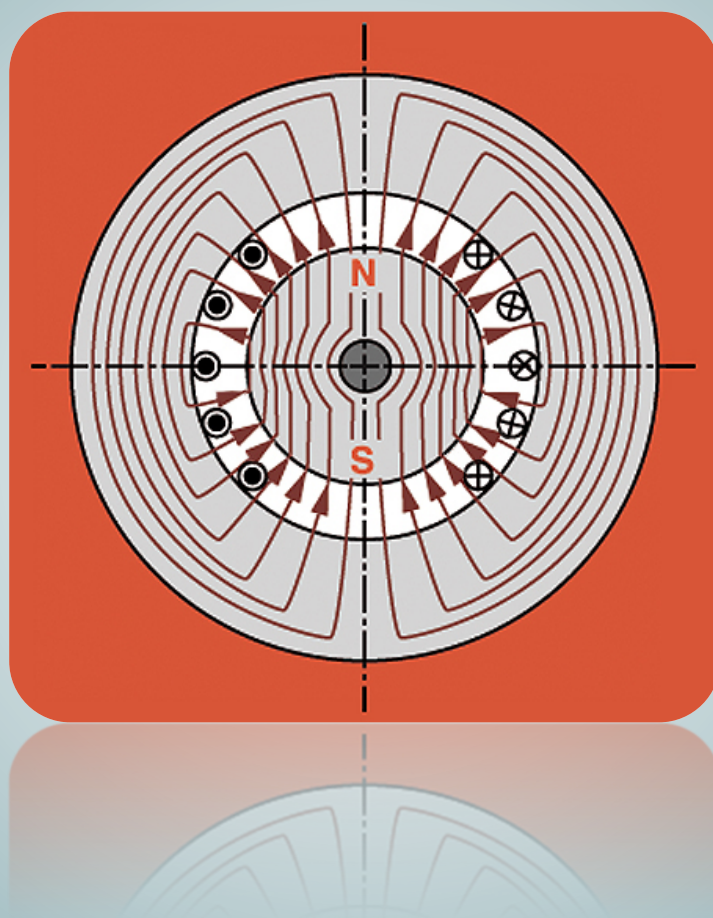


Máquinas Eléctricas I - G862

Tema 4. Máquinas Síncronas. Problemas propuestos



Miguel Ángel Rodríguez Pozueta

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

PROBLEMAS PROPUESTOS DE MAQUINAS SÍNCRONAS

- 1) Un alternador síncrono trifásico de rotor cilíndrico, 390 kVA, 1250 V, 50 Hz y 750 r.p.m. está conectado en triángulo y ha dado los siguientes resultados cuando ha sido ensayado:

<u>Vacío:</u>						
$I_e(A)$	11,5	15	20	23,5	29	33,5
$V_0(V)$	990	1235	1460	1560	1640	1660
<u>Cortocircuito:</u>						
$I_e(A)$	11,5	15	20	23,5	29	33,5
$I_{cortocL}(A)$	139	179	242	284	347	400

valores de línea

Utilizando un puente de medida de corriente continua se ha medido la resistencia entre cada dos bornes del devanado del estator, que resulta ser de $0,144 \Omega$.

Obtener:

- la resistencia efectiva por fase si el coeficiente de efecto piel o "skin" es 1,2.
 - la caída de tensión (regulación de tensión) en %, si la carga es igual a la asignada con un factor de potencia es 0,9 inductivo y la corriente de excitación es de 33,5 A. Utilizar el método de Behn-Eschenburg.
 - la corriente de excitación necesaria alimentar con una tensión de 1000 V a un motor asíncrono que está proporcionando una potencia mecánica de 150 kW y que está funcionando con un factor de potencia 0,832 inductivo y con un rendimiento 0,9.
- 2) Un alternador síncrono trifásico de rotor cilíndrico, 7,536 MVA y 11 kV está conectado en estrella y ha dado los siguientes resultados cuando ha sido ensayado:

<u>Vacío:</u>								
$I_e(A)$	50	75	105	142	169	210	270	355
$V_0(kV)$	2,32	3,5	4,64	5,8	6,4	6,96	7,5	8,1

tensión de fase

Cortocircuito:
 $I_e = 170 A$; $I_{cortocL} = 396 A$;

Característica reactiva con $I_L = 396 A$:
 $I_e = 400 A$; $V_L = 11 kV$ tensión de línea;

Empleando el método de Potier y despreciando la resistencia del inducido, determinar

- la corriente que debe circular por el devanado inductor para que el alternador suministre una potencia reactiva de 6000 kvar, con un factor de potencia nulo capacitivo.
- la regulación, expresada en %, cuando esta máquina suministra la potencia asignada y su factor de potencia es 0,8 inductivo.

- 3) Utilizando el método A.S.A. obtener la regulación de un turboalternador trifásico de 50 MVA, 13,8 kV y 50 Hz que está funcionando a plena carga con un factor de potencia 0,8 inductivo y cuyo estator está conectado en estrella.

Para obtener las curvas características de esta máquina se han realizado varios ensayos en los que se han obtenido estos resultados:

Vacío:

I_e (A)	200	400	600	800	1000	1200	
V_{0L} (kV)	7,42	13,2	15,5	16,7	18	18,8	valores de línea

Carga reactiva:

I_e (A)	400	600	800	1000	1200	
V_L (kV)	0	6,35	10,9	13,4	14,8	valores de línea

Cortocircuito:

I_e (A)	200	400	600
I_{corto} (A)	1046	2092	3100

- 4) Se tiene un hidroalternador trifásico de polos salientes de 50 MVA y 15 kV, que tiene su estator conectado en estrella y cuyos parámetros de resistencia y de reactancia por fase son los siguientes:

$$\begin{aligned} R &= 0,12 \, \Omega; & X_d &= 3,2 \, \Omega \\ X_\sigma &= 0,8 \, \Omega; & X_q &= 2,1 \, \Omega \end{aligned}$$

Mediante el método de Blondel determinar:

- a) La caída de tensión por fase -en valor absoluto y por unidad (p.u.)- debida al efecto conjunto de la resistencia óhmica y de la reactancia de dispersión cuando la máquina está funcionando a plena carga y con factor de potencia 0,8 inductivo.
- b) La fuerza electromotriz (f.e.m.) de vacío cuando el hidroalternador funciona con la carga del apartado anterior.
- 15) Un alternador síncrono de rotor cilíndrico, 10 000 kVA, 13 500 V, trifásico, 50 Hz y conexión triángulo tiene su devanado inducido con una resistencia por fase de $0,5454 \, \Omega$ y una reactancia, también por fase, de $12 \, \Omega$ ($X_i = 10,5 \, \Omega$; $X_\sigma = 1,5 \, \Omega$).
Calcular:

- a) la resistencia por fase en forma porcentual.
- b) la reactancia por fase en forma porcentual.
- c) la f.e.m. E_0 inducida a plena carga alimentando a un circuito capacitivo con factor de potencia 0,8.
- d) la f.e.m. E_r

NOTA; Dibujar diagrama fasorial, usando como referencia el fasor de la tensión por fase del alternador.

- 16)** Se tiene un generador síncrono de rotor cilíndrico de tres fases, 10 MVA, 11 kV, conexión estrella, cuya curva de vacío está representada en la hoja adjunta. Los ensayos de cortocircuito y de carga reactiva han dado estos resultados:

Ensayo de cortocircuito: $I_{\text{cortocL}} = 565,7 \text{ A}$; $I_e = 200 \text{ A}$

Ensayo de carga reactiva: $I_L = 396 \text{ A}$; $I_e = 480 \text{ A}$; $V_L = 11 \text{ kV}$

La resistencia del inducido es despreciable.

- a) Calcular la corriente de excitación necesaria para obtener una corriente de cortocircuito de 396 A.
 - b) Dibujar el triángulo de Potier y obtener la reactancia de dispersión X_σ (suponerla igual a la reactancia de Potier) y la f.m.m. de reacción de inducido $\mathcal{F}_A$ cuando el valor eficaz de las corrientes en las fases del inducido vale 396 A.
 - c) Calcular mediante el método de Potier, la f.e.m. de vacío E_0 , el ángulo de par y la corriente de excitación I_e necesaria para alimentar a 11 kV de tensión de línea la carga asignada con factor de potencia 0,9 inductivo.
 - d) Calcular la reactancia síncrona no saturada X_s .
- 17)** Se tiene un generador síncrono de rotor liso de tres fases, 10 MVA, 11 kV, conexión estrella, cuya curva de vacío está representada en la hoja adjunta. Los ensayos de cortocircuito y de carga reactiva han dado estos resultados:

Ensayo de cortocircuito: $I_{\text{cortocL}} = 700 \text{ A}$; $I_e = 247,5 \text{ A}$

Ensayo de carga reactiva: $I_L = 396 \text{ A}$; $I_e = 480 \text{ A}$; $V_L = 11 \text{ kV}$

La resistencia del inducido es despreciable.

- a) Calcular la corriente de excitación necesaria para obtener una corriente en el inducido de 396 A en el ensayo de cortocircuito.
- b) Dibujar el triángulo de Potier y obtener la reactancia de dispersión X_σ (suponerla igual a la reactancia de Potier) y la f.m.m. de reacción de inducido $\mathcal{F}_A$ cuando el valor eficaz de las corrientes en las fases del inducido vale 396 A.
- c) Calcular mediante el método A.S.A., la f.e.m. de vacío E_0 y la corriente de excitación I_e necesaria para alimentar a 11 kV de tensión de línea la carga asignada con factor de potencia 0,9 inductivo.

- 18)** Un hidroalternador de 12 MVA, 11 kV, 50 Hz, trifásico, de 8 polos salientes y conexión estrella tiene la característica de vacío representada en la hoja adjunta. Los ensayos de cortocircuito y de carga reactiva han dado estos resultados:

Ensayo de cortocircuito: $I_{\text{cortocL}} = 565,7 \text{ A}$; $I_e = 200 \text{ A}$

Ensayo de carga reactiva: $I_L = 396 \text{ A}$; $I_e = 480 \text{ A}$; $V_L = 11 \text{ kV}$

La resistencia del inducido es despreciable.

- a) Calcular la corriente de excitación necesaria para obtener una corriente de cortocircuito de 396 A.
 - b) Dibujar el triángulo de Potier y obtener la reactancia de dispersión X_σ (suponerla igual a la reactancia de Potier) y la f.m.m. de reacción de inducido $\mathcal{F}_i$ cuando el valor eficaz de las corrientes en las fases del inducido vale 396 A.
 - c) Sabiendo que la reactancia síncrona transversal X_q tiene un valor igual a 0,65 veces la reactancia síncrona longitudinal no saturada $X_d(\text{no sat})$, calcular el valor de estas dos reactancias.
 - d) Calcular la reactancia síncrona longitudinal saturada según el método de Behn-Eschenburg cuando la intensidad de excitación vale 480 A.
 - e) Suponiendo que en los regímenes de trabajo habituales la reactancia síncrona longitudinal conserva un valor prácticamente constante e igual al obtenido en el apartado anterior, calcular el valor de la f.e.m. de vacío necesaria para obtener la tensión asignada con carga asignada y factor de potencia 0,8 inductivo.
- 20)** Un turboalternador síncrono de 20 kV, 575 MVA, 50 Hz y conexión estrella necesita una corriente de excitación de 1140 A para producir la tensión asignada en vacío. Su velocidad de sincronismo es de 1500 r.p.m. La resistencia de las fases del estator es despreciable y la característica de vacío, expresada en valores por unidad, se corresponde con la curva 1 representada en la hoja adjunta. En esta máquina se han efectuado sendos ensayos de carga reactiva y de cortocircuito a intensidad asignada, obteniéndose los siguientes resultados:

Carga reactiva: $V_L = V_{NL}$ $I_L = I_{NL}$ $I_e = 3788 \text{ A}$

Cortocircuito: $I_L = I_{NL}$ $I_e = 1876 \text{ A}$

- a) Dibujar el triángulo de Potier y calcular la reactancia de dispersión X_σ (suponerla igual a la reactancia de Potier) y la f.m.m. de reacción de inducido $\mathcal{F}_i$ cuando la corriente es la asignada.
- b) Utilizando el método de Potier determinar la intensidad de excitación necesaria para obtener la tensión asignada en bornes de la máquina cuando ésta alimenta la mitad de la carga asignada con un factor de potencia 0,8 inductivo.
- c) Calcular la reactancia síncrona saturada correspondiente a la situación del apartado b). Calcular también la reactancia síncrona no saturada.

- 22)** Un turboalternador tetrapolar de 10 MVA, 20 000 V, 50 Hz y conexión estrella tiene la curva de vacío representada por la curva 1 en la hoja adjunta. La corriente de excitación que en vacío proporciona la tensión asignada vale $I_{e0} = 50$ A y la resistencia del inducido es despreciable.

En este alternador se han realizado unos ensayos, obteniéndose los siguientes resultados:

Ensayo de cortocircuito: $I_L = 250$ A $I_e = 47,6$ A.

Ensayo de carga reactiva a intensidad y tensión de inducido asignadas: $I_e = 115$ A.

- a) Dibujar el triángulo de Potier y obtener la reactancia de dispersión X_σ (suponerla igual a la reactancia de Potier) y la f.m.m. de reacción de inducido $\mathcal{F}_i$ para la corriente asignada.
 - b) Calcular la reactancia síncrona no saturada y la saturada para una f.e.m. de vacío igual a la tensión asignada.
 - c) Calcular mediante el método de Potier la f.e.m. de vacío y el ángulo de par cuando este alternador alimenta una carga de 7,2 MW con factor de potencia 0,8 inductivo.
- 30)** Un alternador síncrono de rotor cilíndrico de 5 MVA, 12 450 V, **60 Hz**, trifásico, de 2 polos, conexión estrella y resistencia de inducido despreciable tiene una reactancia de dispersión de $X_\sigma = 3,1 \Omega$ y una reactancia síncrona no saturada de $X_s(\text{no sat}) = 34,1 \Omega$.
- a) Calcular la velocidad de sincronismo n_1 y expresar las reactancias de dispersión X_σ y síncrona no saturada $X_s(\text{no sat})$ en valores por unidad (p.u.).
 - b) Obtener la fuerza electromotriz (f.e.m.) resultante E_r en voltios y en p.u. cuando la máquina funciona con su corriente asignada y factor de potencia 0,9 inductivo.
 - c) Cuando la máquina funciona con la carga del apartado anterior su factor de saturación para la f.e.m. E_r es $k_{sr} = 1,07$. Usando el análisis lineal mejorado obtener para este estado la reactancia síncrona X_{sb} y las f.e.m.s de vacío E_{0b} (sobre la recta de saturación constante) y E_{0c} (sobre la recta del entrehierro).

- 31)** Un hidroalternador de 15 MVA, 20 kV, 50 Hz, trifásico, 12 polos salientes y conexión estrella tiene la característica de vacío representada por la curva 1 en la hoja adjunta. Los ensayos de cortocircuito y de carga reactiva de esta máquina han dado estos resultados:

Ensayo de cortocircuito con corriente de inducido asignada: I_e (p.u.) = 0,8

Ensayo de carga reactiva a corriente y tensión de inducido asignadas: I_e (p.u.) = 2,1

La resistencia del inducido es despreciable y la corriente de excitación que en vacío proporciona la tensión asignada es $I_{e0} = 100$ A.

- a) Dibujar el triángulo de Potier y obtener la reactancia de dispersión X_σ y la f.m.m. de reacción de inducido $\mathcal{F}_i$.
- b) Calcular las reactancias síncronas longitudinal no saturada y saturada cuando la intensidad de excitación vale $I_e = 1,4$ p.u.
- c) Sabiendo que la reactancia síncrona transversal X_q tiene un valor igual a 0,65 veces la reactancia síncrona longitudinal no saturada $X_d(\text{no sat})$, calcular el valor de esta reactancia X_q .
- d) Suponiendo que la reactancia síncrona longitudinal vale $X_d = 0,9$ p.u. y la transversal vale $X_q = 0,6$ p.u., calcular el valor de la f.e.m. de vacío E_0 necesaria para obtener la tensión asignada con la mitad de la carga asignada y factor de potencia 0,8 inductivo. ¿Cuánto vale la corriente de excitación I_e en este caso?

- 32)** Un turboalternador síncrono de 3 MVA, 12000 V, 50 Hz, 2 polos y conexión estrella tiene la curva de vacío representada por la curva 1 en la hoja adjunta. La corriente de excitación que en vacío proporciona la tensión asignada vale $I_{e0} = 50$ A y la resistencia del estator es despreciable.

En este alternador se han realizado unos ensayos, obteniéndose los siguientes resultados:

Ensayo de cortocircuito con corriente de inducido asignada: $I_e = 50$ A.

Ensayo de carga reactiva a intensidad y tensión de inducido asignadas: $I_e = 110$ A.

- a) Dibujar el triángulo de Potier y obtener la reactancia de dispersión X_σ (suponerla igual a la reactancia de Potier) y la f.m.m. de reacción de inducido $\mathcal{F}_i$ para la corriente asignada.
- b) Calcular la reactancia síncrona saturada para I_{e0} y la no saturada.
- c) Calcular mediante el método ASA la corriente de excitación I_e necesaria para alimentar a la tensión asignada a una carga que consume el 75% de la potencia asignada con un factor de potencia 0,8 inductivo. Calcular también el ángulo de par δ en estas condiciones.

- 33)** Un alternador síncrono de rotor cilíndrico de 10 MVA, 12000 V, 50 Hz, trifásico, de 2 polos, conexión estrella y resistencia de inducido despreciable tiene una reactancia de dispersión de $X_\sigma = 0,12$ p.u. La corriente de excitación I_{e0} que origina la tensión asignada en vacío es de 150 A. De su recta de entrehierro y de su característica de cortocircuito se obtienen estos dos puntos:

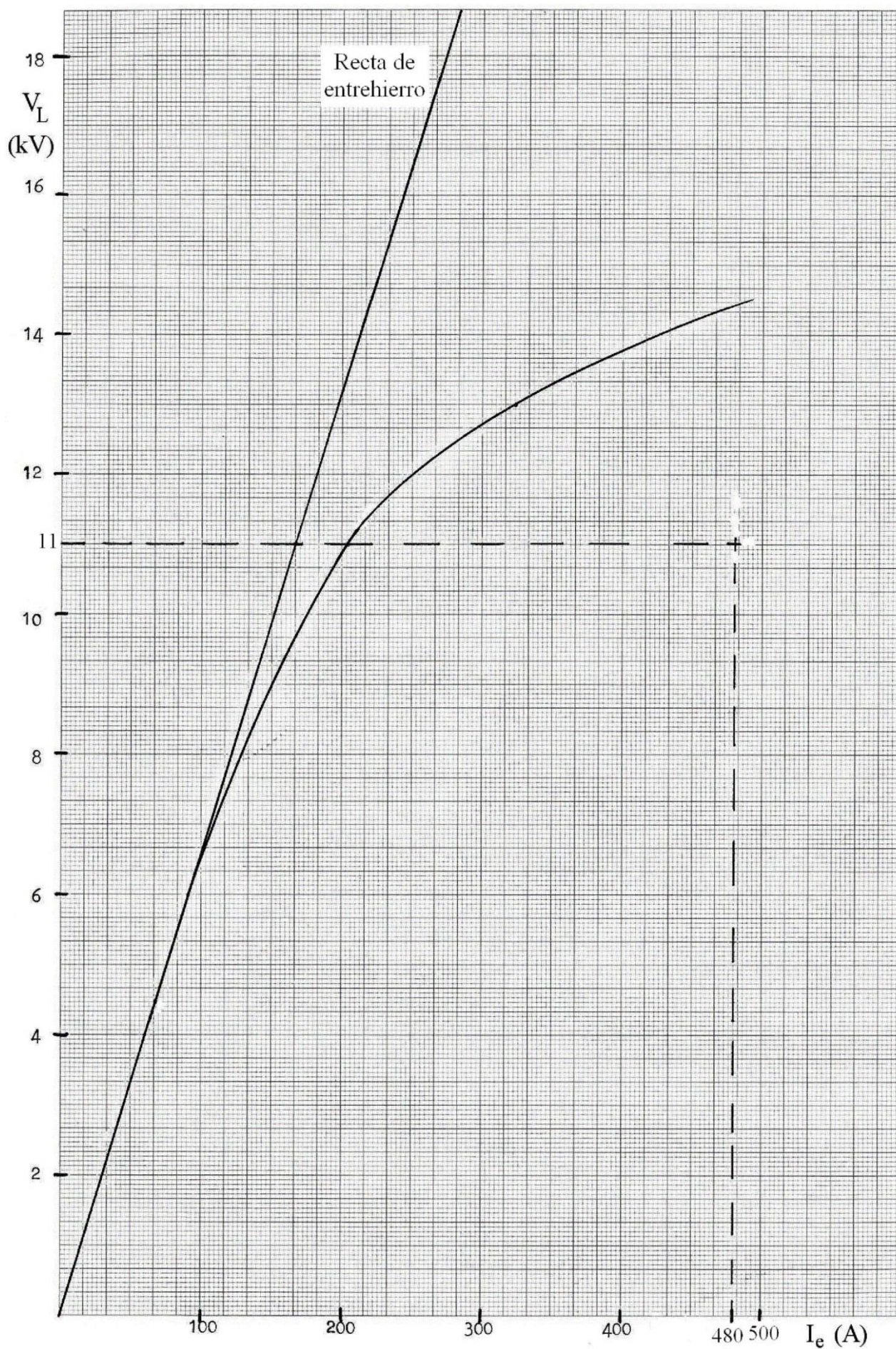
Recta de entrehierro: $I_e = 1$ p.u.; $E_{0c} = 1,044$ p.u.

Característica de cortocircuito: $I_e = 1,073$ p.u.; $I_{corto} = 1$ p.u.

- a)** Obtener las reactancias síncronas no saturada $X_s(\text{no sat})$ y saturada X_s para una corriente de excitación igual a I_{e0} . Expresar estas reactancias tanto en p.u. como en Ohms.
- b)** Obtener la fuerza electromotriz (f.e.m.) resultante E_r en voltios y en p.u. cuando la máquina funciona con su tensión asignada y con el 90% de su corriente asignada y factor de potencia 0,8 inductivo. Si con esta f.e.m. E_r el factor de saturación k_{sr} vale 1,057 ¿Cuál es el valor de su correspondiente f.e.m. E_{rc} sobre la recta de entrehierro?
- c)** Usando el análisis lineal mejorado obtener para el estado de carga del apartado anterior la reactancia síncrona X_{sb} y las f.e.m.s de vacío E_{0b} (sobre la recta de saturación constante) y E_{0c} (sobre la recta de entrehierro).
- d)** ¿Cuál es el valor (en p.u. y en A) de la corriente de excitación I_e correspondiente a los resultados del apartado anterior?

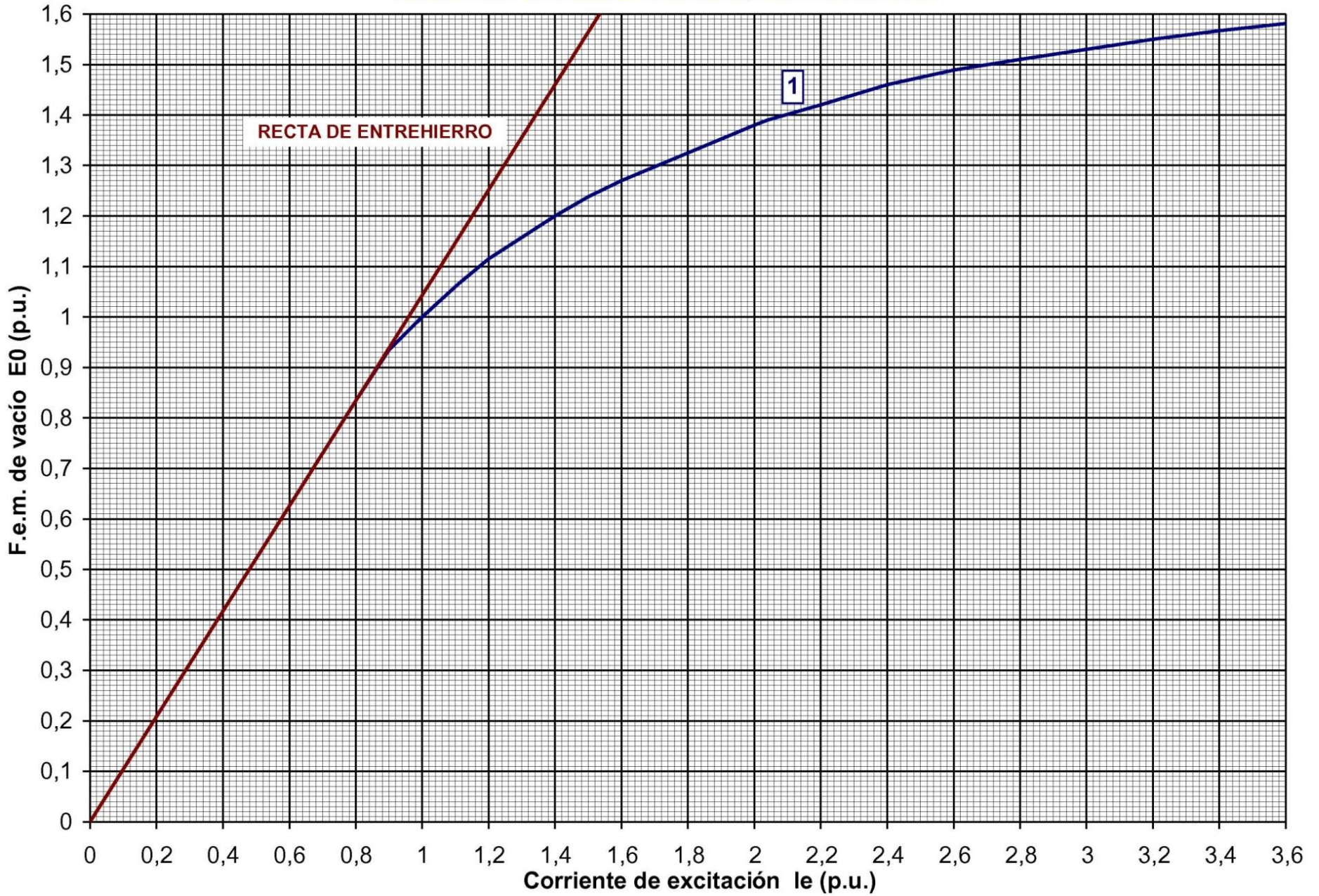
SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS PROPUESTOS DE MAQUINAS SÍNCRONAS

- 1) a) $0,259 \Omega$ b) 41,64% c) 21,2 A
- 2) a) 16 A b) 24,39%
- 3) 26,1%
- 4) a) 1170 V; 0,135 p.u. b) 23141 V (de línea)
- 15) a) 0,01 p.u. b) 0,2195 p.u. c) 12081 V d) 13391 V
- 16) a) 140 A b) $3,79 \Omega$; 104 A
c) 13900 V (de línea); $28,76^\circ$; 414 A d) $13,4 \Omega$
- 17) a) 140 A b) $3,79 \Omega$; 104 A
c) 13930 V (de línea); 415,3 A
- 18) a) 140 A b) $3,79 \Omega$; 104 A c) 13,47 y $8,76 \Omega$
d) $6,15 \Omega$ e) 15896 V (de línea)
- 20) a) $0,264 \Omega$; 1493 A b) 1982 A c) $0,869 \Omega$; 1,195 Ω
- 22) a) 8Ω ; 45 A b) 46,2 y 44Ω c) 26600 V (de línea); $25,6^\circ$
- 30) a) $n_1 = 3600$ r.p.m.; $X_\sigma = 0,1$ p.u.; X_s (no sat) = 1,1 p.u.
b) $E_r = 7529$ V = 1,047 p.u.
c) $E_{0b} = 12390$ V = 1,72 p.u.; $E_{0c} = 13258$ V = 1,85 p.u.
- 31) a) $6,53 \Omega$; 56 A b) $22,14 \Omega$; 18,4 Ω c) $14,4 \Omega$
d) $E_0 = 15127$ V; $E_{0L} = 26200$ V; $I_e = 174$ A; $X_{sb} = 32,1 \Omega = 1,04$ p.u.
- 32) a) $9,6 \Omega$; 40 A b) 48Ω ; 49,9 Ω c) 82,1 A; 23°
- 33) a) 1,12 p.u. = $16,1 \Omega$; 1,075 p.u. = $15,5 \Omega$
b) 1,069 p.u. = 6872 V; 1,13 p.u. = 7929 V
c) 1,066 p.u. = 15,35 W; 1,782 p.u. = 12346 V; 1,884 p.u. = 13053 V
d) 1,805 p.u. = 271 A



Característica de vacío para los problemas 16, 17 y 18

CURVA DE VACÍO DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA



Característica de vacío para los problemas 20, 22, 31 y 32